

0-798150

На правах рукописи



**ФАХРУТДИНОВ АДЕЛЬ ЭДУАРДОВИЧ**

**КОНСТРУКЦИИ ЛЕГКИХ АРОЧНЫХ ЗДАНИЙ,  
РЕАЛИЗУЕМЫХ ПО ПРИНЦИПУ "ОТКРЫТОЙ" ТИПИЗАЦИИ**

**05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Казань – 2012**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Кузнецов Иван Леонидович**

Официальные оппоненты: **Ягофаров Хабид**,  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВПО «Уральский государственный  
университет путей сообщения», профессор ка-  
федры «Строительные конструкции и строи-  
тельное производство»

**Актуганов Анатолий Николаевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный  
технологический университет», доцент кафедры  
«Строительные конструкции и основания»

Ведущая организация: ЗАО «Казанский Гипрониавиапром»

Защита состоится «3» декабря 2012 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.077.01 при Казанском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1, ауд. 3-203 (зал заседаний Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного архитектурно-строительного университета

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ

Автореферат разослан «1» ноября 2012 г.



0000785504

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Абдрахманова Л.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящий момент одной из важных для нашей страны задач является дальнейшее развитие и повышение эффективности народного хозяйства. Данный процесс немаловажен без удовлетворения потребности его отраслей (сельского хозяйства, промышленности, строительства и др.) в быстровозводимых универсальных зданиях различного назначения – складах, ангарах, укрытиях и т.п. В свою очередь, как показывает практика строительства, наилучшими показателями по стоимости и расходу стали в рассматриваемом классе зданий обладают легкие арочные здания.

Обычный подход к проектированию и строительству зданий состоит в назначении фиксированного пролета, габаритной высоты и рациональной конструктивной схемы. Такой подход, естественно, приводит к большому числу вариантов зданий, что затрудняет их реализацию по технико-экономическим критериям. Для сокращения количества типоразмеров используются унифицированные параметры зданий, что, в свою очередь, приводит к нерациональному использованию их площадей. Вместе с тем, в практике строительства известна методика проектирования по принципу «открытой» типизации, который предполагает практическую реализацию указанного множества вариантов зданий, используя при этом минимальное число конструктивных элементов. Объектом типизации в данном подходе выступают конструктивные элементы, не привязанные к параметрам конкретных зданий.

Реализация указанного принципа применительно к конструкциям легких арочных зданий предполагает возведение арок произвольного пролета и очертания из набора однотипных элементов. При этом центральным вопросом проектирования в данном подходе становится разработка простого в реализации и надежного узлового соединения однотипных элементов арки. Очевидно, что наибольший интерес представляют узловые решения, реализующие жесткое соединение элементов под произвольным углом, что обеспечивает полную свободу выбора пролета и очертания арки. Между тем, существующие на данный момент узловые решения не исключают дискретности угла сочленения однотипных элементов.

Данный факт, в свою очередь, не позволяет в полной мере использовать преимущества арочных конструкций, наиболее существенным из которых является придание их оси оптимального очертания. При этом существующие подходы к возведению арочных зданий произвольного пролета из однотипных элементов с обеспечением оптимального очертания оси несущих арок на данный момент находятся на стадии становления и требуют дальнейших исследований.

**Цель работы** – разработка и исследование несущих и ограждающих конструкций легких арочных зданий из однотипных элементов, позволяющих возводить сооружения произвольного пролета и оптимального очертания.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Провести анализ существующих конструктивных решений легких арочных зданий, а также подходов к их проектированию и назначению оптималь-

ных параметров.

2. Разработать новое конструктивное решение и способ возведения легких арочных зданий, обеспечивающие их реализацию при произвольном пролете и оптимальном очертании, используя при этом однотипные элементы.

3. Провести численные и экспериментальные исследования предложенного узлового решения однотипных элементов арки, обеспечивающего их жесткое соединение под произвольным углом, разработать расчетные формулы, а также конструктивные решения по повышению его несущей способности.

4. Разработать методику нахождения оптимального очертания оси и количества однотипных элементов арки при реальных многовариантных нагружениях, а также программу для ЭВМ, реализующую указанную методику.

5. Провести анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих и ограждающих конструкций арочного здания из однотипных элементов при их включении в совместную работу и дать оценку эффективности вариантов реализации данного подхода.

#### **Научная новизна работы:**

1. Предложены новое конструктивное решение и способ возведения легких арочных зданий, обеспечивающие их реализацию при произвольном пролете и оптимальном очертании, используя при этом однотипные элементы.

2. Уточнен характер распределения усилий между крепежными элементами в узловом соединении однотипных элементов и предложены формулы для его расчета.

3. Предложены новые конструктивные решения по повышению несущей способности соединений однотипных тонкостенных элементов, эффективность которых подтверждена численными и экспериментальными исследованиями.

4. Разработана методика нахождения оптимального очертания оси и количества однотипных элементов арки для случая реального многовариантного нагружения по критерию минимума массы, а также составлена программа для ЭВМ, реализующая указанную методику.

5. Показана эффективность включения ограждения в совместную работу с несущими конструкциями арок из однотипных элементов, достигаемая в т.ч. за счет назначения рациональной схемы передачи внешних нагрузок.

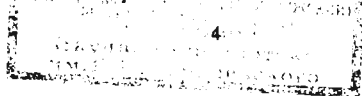
#### **Практическая значимость работы:**

1. Разработаны новое конструктивное решение и способ возведения легких арочных зданий, исключающие многообразие конструктивных решений несущих арок при реализации зданий различных габаритных схем.

2. Разработаны формулы для расчета предложенного узлового соединения однотипных элементов арки, а также конструктивные решения по повышению его несущей способности, эффективность которых подтверждена полученными патентами на изобретения РФ.

3. Разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ «ARKAMAS», реализующая поиск оптимального очертания оси и количества однотипных элементов для трех-, двух- и бесшарнирных арок.

**Реализация работы.** Результаты проведенных исследований использованы ООО «Инвестиционная строительная компания «СтройИнжиниринг» при



разработке чертежей и строительстве тепляков для обеспечения прогрева бетонных и железобетонных конструкций в зимнее время на объектах Универсиады 2013 года в г. Казани по х/д № 15-12/2011 «Разработка чертежей несущих конструкций тепляка», а также ООО «КАМТЕНТ» – в виде комплекта рабочих чертежей для проекта «Ангар сельскохозяйственного назначения А60х12м».

**Достоверность** данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, обеспечена использованием научно обоснованных методик испытаний, тарированных измерительных приборов и сертифицированного оборудования, а также хорошей сходимостью с результатами расчетов конечно-элементных моделей на ПК "ANSYS". Корректность работы расчетного блока разработанной программы для ЭВМ подтверждена сравнением НДС арок оптимального очертания, найденным по "ARKAMAS" и ПК "ЛИРА", при этом расхождение в результатах расчета составило 2-6%.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований докладывались на 62-й республиканской научной конференции КазГАСУ (Казань, 2010), научно-практической конференции студентов и аспирантов «Наука и инновации в решении актуальных проблем города» (Казань, 2010), международной научно-технической конференции «Эффективные строительные конструкции: теория и практика» (Пенза, 2010), международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых» (Йошкар-Ола, 2011), международной научной конференции «Проблемы современного строительства» (Пенза, 2011), 63-й и 64-й всероссийских научных конференциях КазГАСУ (Казань, 2011-2012).

Работа награждена грантом конкурса «Пятьдесят лучших инновационных идей для Республики Татарстан» в номинации «Молодежный инновационный проект» (2010), стипендиями Мэра г.Казани (2010) и Правительства РФ (2011), отмечена дипломом 2-й степени республиканского конкурса научных работ студентов и аспирантов на соискание премии им. Н.И. Лобачевского в секции «Архитектура и строительство» (2010).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 3 научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 патентов на изобретение РФ и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка литературы из 154 наименований и приложений. Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, включает 20 таблиц, 85 рисунков.

**На защиту выносятся:**

1. Конструктивное решение и способ возведения легких арочных зданий, обеспечивающие их реализацию при произвольном пролете и оптимальном очертании, используя при этом однотипные элементы.
2. Результаты численных и экспериментальных исследований предложенного узлового решения однотипных элементов арки, обеспечивающего их жесткое соединение под произвольным углом, и формулы для его расчета.

3. Новые конструктивные решения по повышению несущей способности соединений однотипных тонкостенных элементов, а также результаты их численных и экспериментальных исследований.

4. Методика нахождения оптимального очертания оси и количества однотипных элементов арки для случая реального многовариантного нагружения по критерию минимума массы, и программа для ЭВМ, реализующая указанную методику для трех-, двух- и бесшарнирных арок.

5. Результаты численных исследований по включению ограждения в совместную работу с несущими конструкциями арок из однотипных элементов.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна работы и ее практическая значимость.

**В первой главе** представлен обзор существующих конструктивных решений легких арочных зданий. Рассмотрены становление и развитие принципа "открытой" типизации применительно к проектированию металлических арок, а также указаны возможные пути его дальнейшего развития. Приведен анализ существующих подходов к назначению оптимальных параметров арочных конструкций.

Существенным вкладом в становление и развитие легких арочных конструкций явились разработки специалистов ЦНИИПСК им. Мельникова, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, ЭПКТБ «Стройпластик» Госагропрома Украинской ССР, Украинпроектстальконструкции, Уральского политехнического института. Из зарубежного опыта проектирования легких арочных конструкций стоит отметить здания производства фирм «Финмекано» (Финляндия), «Wedg Cor Inc.» (США), «Zemal» (Австрия).

Из практики реализации легких арочных зданий на основе принципа «открытой» типизации внимания заслуживают стальные арочные конструкции зданий многоцелевого назначения из унифицированных элементов двутаврового сечения с объемно-формованной стенкой, разработанные в ЦНИИПСК им. Мельникова. Целый ряд конструктивных решений металлических арок из однотипных элементов был разработан сотрудниками Казанского инженерно-строительного института. Среди них отдельно стоит выделить арочные конструкции с однотипными элементами, выполненными из выштампованных полосовых отходов, внедренные в серийное производство на Тукаевском РТП (г. Наб. Челны).

К общим недостаткам указанных решений стоит отнести наличие дискретности в узлах соединения однотипных элементов, а также высокую трудоемкость их реализации.

Поиском рациональной формы арок занимались такие выдающиеся ученые как Ф.И. Герстнер, С.И. Белзецкий, В.И. Руднев, Э.П. Клявинь, В.А. Киселев, Ф.С. Ясинский. Проведенные ими исследования в области определения оптимального очертания оси арки всецело опираются на понятие веревочной кривой, имеющей смысл лишь для одной конкретной нагрузки. Нахождению опти-

мального очертания оси арки при многих вариантах загрузки посвящены труды А.П. Филина, Е.С. Фалилеевой, А.С. Дехтяря, И.Л. Кузнецова.

Первыми шагами на пути становления методики назначения оптимальных параметров арочных зданий, проектируемых по принципу "открытой" типизации, явились исследования С.А. Пеньковцева, изложенные им в работе "Несущие металлические конструкции облегченных зданий из унифицированных элементов". Им были решены частные задачи по определению оптимальных очертаний осей арок из 3-х, 4-х, 5-ти и 6-ти однотипных элементов. Несмотря на полученные положительные результаты, данная работа не решила задачу по разработке методики нахождения оптимального очертания оси полигональной арки в общей постановке.

Вместе с тем, требования к экономии металла, снижению трудоемкости изготовления и монтажа обязывают к дальнейшему совершенствованию конструкций облегченных арочных зданий. При этом данный процесс возможен на основе применения современных эффективных стальных профилей и ограждающих конструкций, а также последних достижений в области проектирования легких металлических арок. С учетом вышеизложенного были сформулированы цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке нового конструктивного решения и способа возведения легких арочных зданий на основе принципа "открытой" типизации, обеспечивающих их реализацию при произвольном пролете и оптимальном очертании, а также формул для расчета предложенного узлового соединения однотипных элементов арки. Приведены данные по исследованию работы указанного узлового соединения и разработке конструктивных решений по повышению его несущей способности.

В предложенном решении несущие арки выполняются из однотипных элементов из тонкостенных прямолинейных стержней с промежуточными узловыми фасонками, соединенными с концами стержней (рис.1). В узлах соединения элементов по аркам устанавливаются прогоны, по которым укладывается ограждение.

Основная идея предлагаемой конструкции состоит в следующем. Назначается требуемый пролет арки и пределы изменения стрелы ее подъема, исходя из которых определяется количество однотипных элементов. Затем элементы в горизонтальном положении соединяются между собой при помощи узловых фасонки путем установки центральных болтов с образованием шарнирной цепи. Далее поворотом элементов вокруг центрального болта арке придается требуемое очертание, в том числе может быть реализовано и оптимальное. После придания арке окончательного очертания концы однотипных элементов жестко прикрепляют к узловым элементам путем установки болтов либо самосверлящих самонарезающих винтов (ССВ) (рис. 2), размещаемых вокруг центральных болтов. Собранная арка устанавливается в вертикальное положение и соединяется с соседними прогонами и связями. По прогонам укладывается ограждение.

Таким образом, изменяя число однотипных элементов и соединяя их под требуемым углом, обеспечивается реализация арки произвольных габаритов.

Изменение усилий в этих случаях может быть компенсировано: 1) приданием арке оптимального очертания; 2) назначением соответствующего шага установки арок; 3) изменением статической схемы работы арок; 4) включением ограждения в совместную работу с несущими арками; 5) использованием перечисленных приемов в любой комбинации.

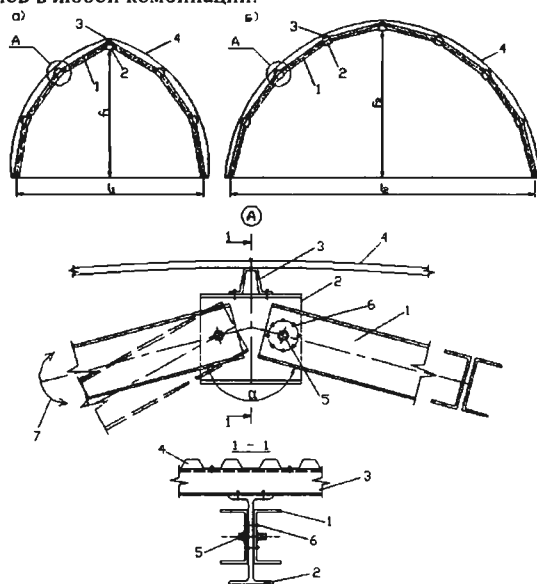


Рис. 1. Общее конструктивное решение и узлы арочных зданий из однотипных элементов: а) арка из шести элементов пролетом  $l_1$  и стрелой подъема  $f_1$ ; б) арка из восьми элементов пролетом  $l_2$  и стрелой подъема  $f_2$ ; 1 – однотипный элемент из парных швеллеров; 2 – узловая фасонка; 3 – прогон; 4 – ограждение; 5 – центральный болт; 6 – самосверлящий самонарезающий винт (ССВ) или болт; 7 – направление поворота элемента при установке требуемого очертания оси арки.

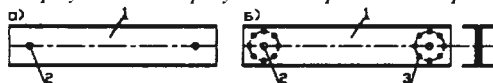


Рис. 2. Варианты исполнения однотипных элементов: а) однотипный элемент при его жестком креплении к узловой фасонке путем установки ССВ; б) то же, путем установки болтов; 1 – однотипный элемент из парных швеллеров; 2 – отверстие под центральный болт; 3 – отверстие под болт.

Разработка нового узлового соединения однотипных элементов арки потребовала численно-экспериментального исследования его работы и выбора расчетных формул.

Суть натурных испытаний заключалась в загрузке экспериментального образца узлового соединения однотипных элементов арки сосредоточенной нагрузкой на гидравлическом прессе типа УГ 20/2 (рис. 3). Разрушение произошло при нагрузке 1900 кг вследствие потери местной устойчивости стенки фа-



сонки. При этом теоретическое значение разрушающей нагрузки для узлового соединения составляло 1340 кг.

Для анализа и проверки данных, полученных в ходе натурных испытаний, были проведены численные исследования действительной работы узлового соединения однотипных элементов арки на ПК «ANSYS» (рис. 4). Параметры узлового соединения и характер его работы моделировались в программном комплексе согласно проведенному эксперименту.

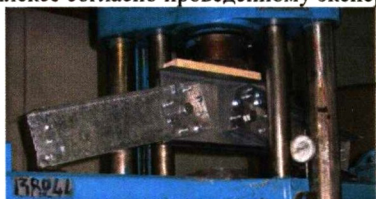


Рис. 3. Испытание образца узлового соединения однотипных элементов арки на гидравлическом прессе типа УГ 20/2.

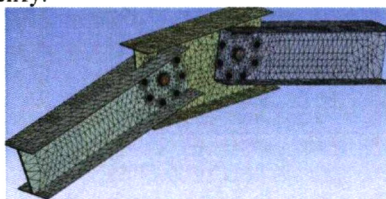


Рис. 4. Расчетная модель узлового соединения и ее разбиение на конечные элементы ( $n = 86\,964$ ) в ПК «ANSYS».

Качественное сходство графиков зависимости вертикальных перемещений узлового соединения от прикладываемой нагрузки (рис. 5) при натурном и численном исследованиях образца свидетельствовало о достоверности полученных в ходе испытаний данных и возможности использования ПК «ANSYS» для анализа НДС узла соединения однотипных элементов арки.

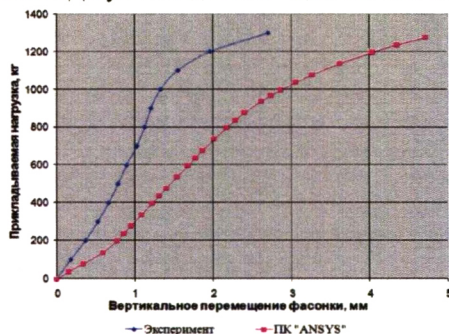


Рис. 5. График зависимости вертикального перемещения фансонки от нагрузки, прикладываемой к узлу соединения, в эксперименте и на ПК «ANSYS».

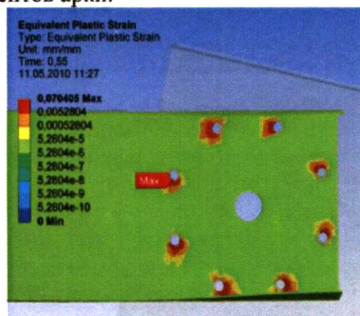


Рис. 6. Пластические деформации в отверстиях самосверлящих самонарезающих винтов стенки однотипного элемента.

Как показало компьютерное моделирование, загрузка метизов в соединении является неравномерной (рис. 6). При этом становится очевидной необходимость выбора расстановки крепежных элементов, обеспечивающей наибольшую жесткость и несущую способность узла. Для определения рациональной схемы расстановки метизов в ПК «ANSYS» были исследованы 4 варианта их расположения возле центрального стяжного болта (рис. 7). За основу для выбора расчетных схем были взяты узловая фансонка двутаврового сечения, же-

стко заземленная с одной стороны, и отрезок однотипного элемента из спаренных тонкостенных швеллеров (рис. 8). К свободному концу элемента прикладывалась вертикальная нагрузка, при этом отслеживались вертикальное и горизонтальное перемещения контрольной точки, вертикальное перемещение свободного края однотипного элемента и величина максимальных относительных пластических деформаций в отверстиях метизов.

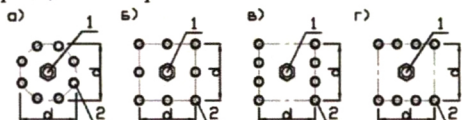


Рис. 7. Варианты расстановки метизов: а – «по кругу»; б – «по квадрату»; в – «по вертикали»; г – «по горизонтали»; 1 – центральный болт; 2 – метиз.

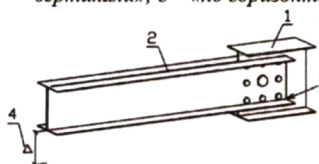


Рис. 8. Вариант расчетной схемы с расстановкой метизов «по квадрату»: 1 – узловая фасонка; 2 – отрезок однотипного элемента; 3 – расположение контрольной точки; 4 – вертикальное перемещение конца элемента.



Рис. 9. Экспериментальные образцы соединений однотипных элементов с расстановкой метизов «по горизонтали».

Как показали результаты численных исследований, наиболее жестким является расположение метизов «по горизонтали» (рис. 7, г). Для подтверждения полученных данных были проведены натурные испытания экспериментальных образцов узлового соединения с расстановкой метизов «по горизонтали» (рис. 9), при этом его параметры были аналогичны образцу с расположением крепежных элементов «по окружности» (рис. 3).

Узел соединения элементов с расположением метизов «по горизонтали» работал в упругой стадии до нагрузки в 1100 кг, а с расположением «по окружности» – до 1050 кг. При указанных нагрузках напряжения в расчетных сечениях однотипного элемента и узловой фасонки составили порядка 60% и 45% от расчетных соответственно. Количество ССВ в первом эксперименте (рис. 3) составило 8 штук, во втором (рис. 9) – 6, что свидетельствует о целесообразности выбора расстановки метизов «по горизонтали» как наиболее эффективной. Схема загрузки метизов для данной расстановки приведена на рис. 10.

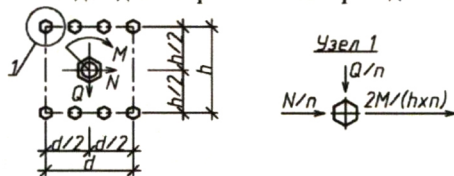


Рис. 10. Схема загрузки метизов узла соединения однотипных элементов арки.

Требуемое число метизов в соединении однотипных элементов с расстановкой метизов «по горизонтали» можно определить из выражения:

$$n \geq \frac{\sqrt{(2M + N \cdot h)^2 + (Q \cdot h)^2}}{N_m \cdot h \cdot \gamma}, \quad (1)$$

где  $M$ ,  $N$ ,  $Q$  – изгибающий момент, продольная и поперечная силы соответственно, действующие в узле;  $h$  – расстояние между осями метизов противоположных рядов;  $N_m$  – меньшее из значений, соответствующих несущей способности стенки отверстия однотипного элемента на смятие телом метиза и несущей способности тела метиза на срез;  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий неравномерность включения в работу метизов соединения.

Как показали испытания, в подавляющем большинстве соединений тонкостенных элементов, работающих на сдвиг, критерием, определяющим их несущую способность, является смятие стенки отверстия в тонкостенном элементе телом крепежного элемента. Для повышения несущей способности таких соединений автором предложен ряд конструктивных мер. Суть первого решения заключается в увеличении толщины металла холодногнутого элемента открытого сечения в зоне его крепления путем отгиба участка стенки с предварительно проделанными прорезями до контакта с основной стенкой профиля (рис. 11). Второй способ заключается в установке в упор торца стенки тонкостенного элемента скобы из листовой стали (рис. 12).

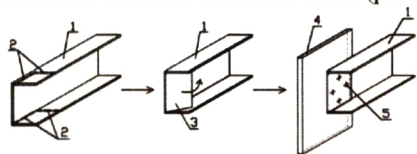


Рис. 11. Способ соединения тонкостенных элементов открытого профиля по типу «загиб»: 1 – тонкостенный профиль; 2 – продольный и поперечный надрезы; 3 – отогнутый участок стенки профиля; 4 – фланец; 5 – метизы.

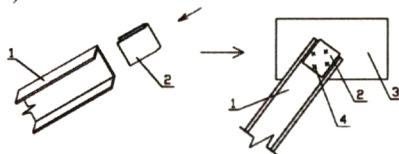


Рис. 12. Способ соединения тонкостенных сжатых элементов открытого профиля по типу «скоба»: 1 – тонкостенный профиль; 2 – скоба из листовой стали; 3 – фланец; 4 – метизы.

В качестве еще одного конструктивного решения, повышающего несущую способность соединений тонкостенных элементов открытого сечения, предложена установка в зону крепления профиля вкладыша из листовой стали с размерами, предполагающими упор его граней в полки элемента (рис. 13).

Проведенные численные и экспериментальные исследования узловых соединений однотипных элементов арки, усиленных предложенными спо-



Рис. 13. Способ усиления соединений тонкостенных элементов открытого профиля путем установки листового вкладыша.

собами, показали возможность существенного повышения эффективности соединений тонкостенных элементов, а именно: загиб участка стенки элемента или установка листового вкладыша обеспечивает повышение прочности узла до 2 раз, установка скобы из листовой стали – до 1,5 раз.

Третья глава посвящена разработке методики нахождения оптимального очертания оси и количества однотипных элементов арки при реальных многовариантных загрузениях, а также программы для ЭВМ, реализующей указанную методику.

Наиболее существенным способом повышения эффективности арок является назначение оптимального очертания их оси. Вместе с тем, применительно к аркам, проектируемым по принципу "открытой" типизации, помимо традиционной постановки указанной задачи возникает вопрос назначения оптимального числа (длины) однотипных элементов. Таким образом, задача отыскания оптимального очертания в нашем случае заключается в нахождении координат узлов однотипных элементов рациональной длины, лежащих на кривой, описывающей оптимальное очертание оси криволинейной арки из условия минимума ее массы с учетом реальных многовариантных загрузений.

После разбиения полупролета арки сплошного и постоянного по всей длине сечения на  $n$  частей ее масса может быть записана в виде:

$$G = \frac{2 \cdot \psi_a \cdot \gamma}{R_y \cdot \gamma_c} \cdot \left( N + \frac{M}{\rho} \right)_{\max} \cdot \sum_{i=1}^n S_i, \quad (2)$$

где  $\psi_a$  – конструктивный коэффициент арки;  $\gamma$  – плотность металла;  $R_y$  – расчетное сопротивление металла;  $\gamma_c$  – коэффициент условия работы;  $(N + M/\rho)_{\max}$  – максимальное расчетное сочетание усилий для арки от всех вариантов загрузений;  $\rho = W/F$  – ядровое расстояние сечения арки,  $W$  и  $F$  – момент сопротивления и площадь поперечного сечения арки;  $S_i$  – длина  $i$ -го стержня арки.

В качестве функции, описывающей оптимальное очертание оси криволинейной арки, используем полином третьей степени вида:

$$y = A \cdot x + B \cdot x^2 + C \cdot x^3, \quad (3)$$

Значение  $(N + M/\rho)_{\max}$  определяется непосредственно из матрицы:

$$\left( N + \frac{M}{\rho} \right)_{\max} = \max \begin{bmatrix} N_{11} + \frac{M_{11}}{\rho} & \dots & N_{1j} + \frac{M_{1j}}{\rho} & \dots & N_{1m} + \frac{M_{1m}}{\rho} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ N_{i1} + \frac{M_{i1}}{\rho} & \dots & N_{ij} + \frac{M_{ij}}{\rho} & \dots & N_{im} + \frac{M_{im}}{\rho} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ N_{n1} + \frac{M_{n1}}{\rho} & \dots & N_{nj} + \frac{M_{nj}}{\rho} & \dots & N_{nm} + \frac{M_{nm}}{\rho} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $N_{ij}$ ,  $M_{ij}$  – значения изгибающего момента и продольной силы соответственно в  $i$ -м стержне от  $j$ -го нагружения.

Значение нормальной силы  $N_{ij}$  определяется по формуле:

$$N_{ij} = H_j \cdot \cos \varphi_i + Q_{ij}^0 \cdot \sin \varphi_i, \quad (5)$$



где  $H_j$  – распор арки от  $j$ -го нагружения;  $Q_{ij}^0$  – балочная перерезывающая сила в  $i$ -м стержне от  $j$ -го нагружения;  $\cos\varphi_i, \sin\varphi_i$  – косинус и синус соответственно угла наклона  $i$ -го стержня к горизонту.

Значение распора в случае трехшарнирной арки вычисляется по формуле:

$$H_j = M_{nj}^0 / y_n, \quad (6)$$

где  $M_{nj}^0$  – балочный изгибающий момент в середине пролета арки;  $y_n = f$  – стрела подъема арки.

Значение распора в случае двухшарнирной арки постоянного по всей длине сечения при нагружении симметричной нагрузкой, пренебрегая продольными и поперечными деформациями ввиду их малости и воспользовавшись способом перемножения эпюр Верещагина, вычисляется по формуле:

$$H_j = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{M_{ij}^0 \cdot (2y_i - y_{i-1}) + M_{i-1j}^0 \cdot (y_i + 2y_{i-1})}{2(y_i^2 + y_{i-1}^2 + y_i \cdot y_{i-1})} \right], \quad (7)$$

где  $M_{ij}^0$  – балочный момент в  $i$ -м стержне от  $j$ -го нагружения;  $y_i, y_{i-1}$  – ординаты  $i$ -й и  $(i-1)$ -й точек разбиения полупролета арки соответственно.

Для арок, нагруженных несимметричными нагрузками, величина распора определяется как сумма значений, вычисленных по (7) отдельно для левой и правой полуарок.

Значение изгибающего момента  $M_{ij}$  определяется по формуле:

$$M_{ij} = |M_{ij}^0 - H_j \cdot y_i|, \quad (8)$$

Оптимальное число однотипных прямолинейных элементов по критерию минимума массы арки, составленной из них, определяется из выражения:

$$m_{opt} = \sqrt[3]{\frac{4\xi_2}{\xi_1(2k+1)(e+\rho)}}, \quad (9)$$

где  $\xi_1$  – отношение массы узловой фасонки к массе арки;  $k$  – отношение высоты стрелы подъема  $f$  к пролету арки  $L$ ;  $e$  – эксцентриситет;  $\rho$  – ядровое расстояние сечения однотипного элемента;  $\xi_2$  – коэффициент, учитывающий приращение изгибающего момента от спрямления оси арки:

$$\xi_2 = \frac{k \left( 1 + \frac{16}{3} k^2 \right)}{1 + 4k^2} \cdot L, \quad (10)$$

С учетом вышеизложенного задачу определения оптимального очертания арки, составленной из  $m$  числа прямолинейных стержней одинаковой длины, узлы которых лежат на кривой, описываемой уравнением (3), можно представить в виде:

$$G^{np} = F(A, B, C, m) = \min, \quad (11)$$

Для определения оптимального очертания осей трех-, двух- и бесшарнирных арок, составленных из набора однотипных элементов, была составлена программа для ЭВМ «ARKAMAS» на языке программирования C++ в среде Borland C++ Builder 3. Упрощенная блок-схема программы «ARKAMAS» представлена на рис. 14.

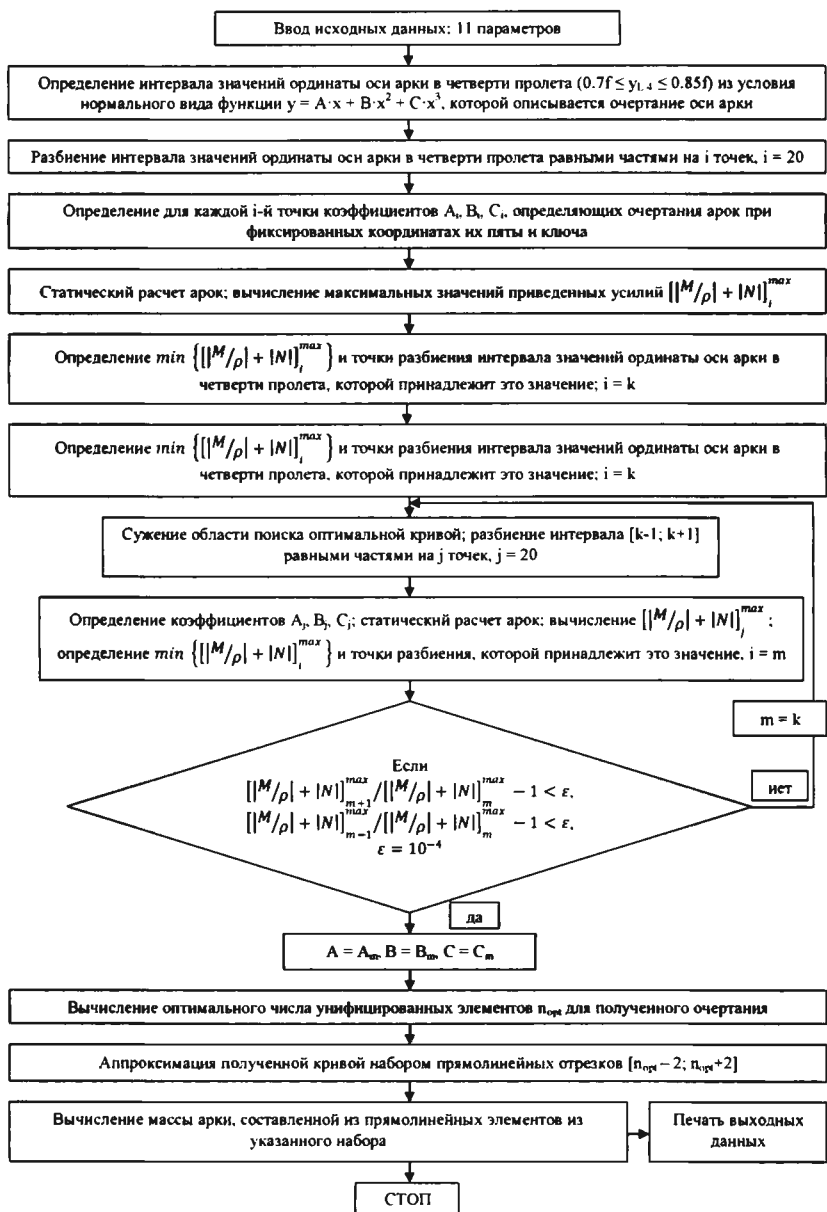


Рис. 14. Упрощенная блок-схема программы «ARKAMAS».

Упрощенная блок-схема подпрограммы по аппроксимации оптимальной криволинейной арки заданным числом равных отрезков приведена на рис. 15.

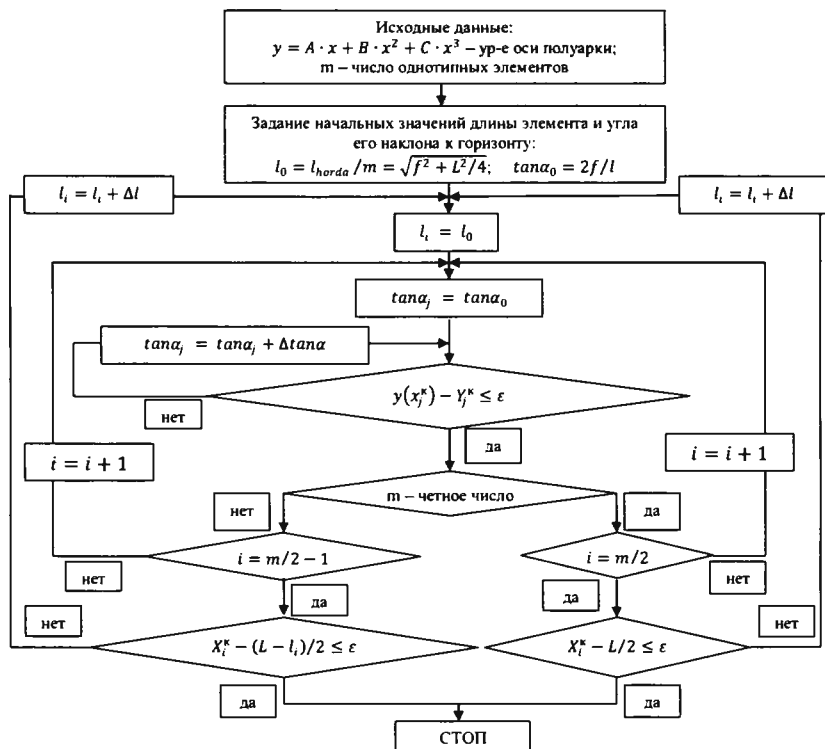


Рис. 15. Упрощенная блок-схема подпрограммы по аппроксимации оптимальной криволинейной арки заданным числом равных отрезков.

Для определения неизвестных реакций в случае бесшарнирной арки в «ARKAMAS» предусмотрена подпрограмма, реализующая нахождение неизвестных канонического уравнения метода сил.

Как показали расчеты, реализация оптимального очертания позволяет значительно снизить расход стали в арках, составленных из набора однотипных элементов, по сравнению с традиционными очертаниями по дуге окружности и квадратной параболе: для трехшарнирных арок – от 15 до 42 %, для двухшарнирных арок – от 6 до 24 %, для бесшарнирных арок – от 10 до 42%. Назначение рационального числа однотипных элементов также является эффективной мерой по снижению материалоемкости таких конструкций – в рассмотренных примерах отклонение от оптимального числа однотипных элементов на две единицы дает перерасход металла до 7%. Для арок оптимального очертания с относительной высотой подъема стрелы в пределах  $0,3 \div 0,5$  оптимальное число

однотипных элементов находится в интервале  $n_{opt} = (0,5 \div 0,7)L$ , где  $L$  – пролет арки, м. При этом узлы однотипных элементов арок оптимального очертания принадлежат кривым, расположенным в интервале между кривой, очерченной по дуге окружности, и кривой, очерченной по квадратной параболе.

Следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев расчетным сочетанием нагрузок является комбинация собственного веса, снега на половине пролета арки и давления ветра со стороны снегового мешка. Кроме того, при прочих равных условиях трехшарнирные оптимальные арки не уступают по экономичности двухшарнирным.

**Четвертая глава** посвящена анализу НДС несущих и ограждающих конструкций легкого арочного здания, проектируемого по принципу "открытой" типизации, при их включении в совместную работу и оценке эффективности вариантов реализации данного подхода.

К настоящему моменту при реализации ограждающих конструкций легких арочных зданий наибольшее распространение получили листы сотового и монолитного поликарбоната, различные тентовые и пленочные материалы, а также профилированный стальной настил. Последний, в свою очередь, обладает рядом преимуществ по сравнению с другими типами обшивок: высокой прочностью и жесткостью, большим сроком эксплуатации (~20 лет), невысокой стоимостью.

Вопрос придания длинномерным профилированным листам криволинейной формы, повторяющей очертание несущей арки здания, может быть решен несколькими путями: 1) принудительным загибом прямолинейных листов по прогонам арки; 2) сопряжением набора криволинейных листов, вальцованных по различным радиусам, по типу коробовой кривой; 3) использованием вальцованных листов требуемой кривизны на всю длину арки.

Повышение эффективности легких арочных зданий на основе принципа совмещения несущей и ограждающей функций ограждения из профилированного стального настила возможно на основе: 1) включения обшивки в совместную работу с несущими арками; 2) назначения рациональной схемы передачи внешних нагрузок на арки за счет изменения числа и шага прогонов в пределах несущей способности ограждения.

Для оценки эффективности первого подхода на ПК «ANSYS» было исследовано НДС конструктивных элементов фрагмента легкого арочного здания с арками из однотипных элементов (рис. 16). Учет влияния условий крепления конструктивных элементов здания между собой осуществлялся заданием соответствующих типов контакта между элементами.

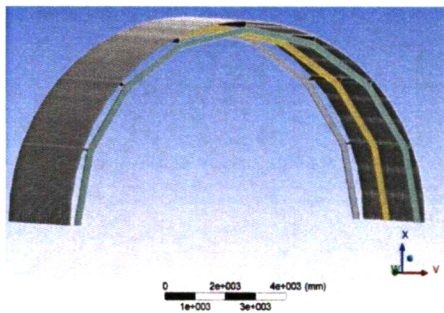


Рис. 16. Расчетная схема фрагмента легкого арочного здания в ПК «ANSYS».



В рассмотренной задаче снижение максимальных напряжений в расчетном сечении арки с учетом включения обшивки по сравнению с ее автономной работой составило 10,5%, а деформаций – 24%. Также были определены некоторые особенности при реализации данного подхода, а именно:

- ширина включения профилированного стального настила в зоне расчетного сечения арки существенно отличается от аналогичной величины, вычисляемой на основе существующих рекомендаций, и поддерживающий эффект прослеживается по всей длине прогона;

- для увеличения доли включения ограждения в работу необходимо повышать жесткость узла крепления прогона к арке и снижать податливость крепления обшивки к прогону;

- защемление ограждения из профнастила непосредственно на фундаменте не дает ощутимого эффекта по сравнению с его опиранием на прогон, расположенный в уровне плиты арки (снижение напряжений менее чем на 0,1%, а перемещений – менее 1%);

- увеличение числа прогонов позволяет снизить напряжения и незначительно деформативность (до 19% и 1% соответственно при увеличении числа прогонов с 7 до 9);

- увеличение доли включения ограждения целесообразно осуществлять за счет применения профнастила с большей высотой гофра, но меньшей толщиной.

Соединение тонкостенной обшивки с несущими арками посредством прогонов не может гарантировать восприятие сдвигающих усилий между обшивкой и каркасом без соблюдения ряда конструктивных мер, реализация которых требует больших трудозатрат. Вместе с тем, ограждение из профнастила, обладая достаточной несущей способностью, может быть рассмотрено как самостоятельная арочная конструкция, имеющая в пролете промежуточные опоры в местах крепления к прогонам арки, гарантированно запрещающие лишь вертикальные перемещения.

Очевидно, что расположение прогонов будет существенным образом влиять на НДС арки. Варьируя шагом прогонов и их числом в пределах несущей способности ограждения, представляется возможность регулировать усилия в арке в определенном интервале. При этом снижение числа прогонов позволит снизить расход металла и трудоемкость при монтаже конструкций, а также более полно использовать резервы несущей способности ограждения.

Для подтверждения эффективности предложенного подхода на ПК "ЛИРА" путем рассмотрения возможных вариантов была решена частная задача по определению рационального интервала расположения 2-х и 3-х прогонов арки, ось которой описывает полуокружность, с учетом реальных многовариантных загрузок из условия минимума массы: 1) ограждения; 2) несущей арки; 3) арочного здания в целом.

Для варианта с двумя прогонами рациональный угол наклона касательной к оси арки в месте опирания прогона из условия минимума массы арочного здания составляет 15-25°, с тремя прогонами – 35-45° (средний располагается в коньке арки).

Пример реализации арочного здания с различными схемами расстановки

и числом прогонов показал, что установка всего 2-х прогонов вместо их регулярного расположения позволяет снизить расход стали на здание до 11%. При этом достигается сокращение трудозатрат при монтаже прогонов и ограждающих конструкций.

**Приложение** содержит таблицы для определения значений балочных изгибающих моментов и перерезывающих сил в сечениях трехшарнирной арки от действия различных нагрузок, текстовый файл разработанной программы «ARKAMAS», а также акты о внедрении результатов исследований.

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**

1. На основе анализа существующих конструктивных решений и опыта применения в строительстве легких арочных зданий установлено, что реализация принципа "открытой" типизации при их проектировании позволяет возводить сооружения различного пролета и очертания, используя при этом минимальный набор однотипных элементов, что приводит к исключению многообразия конструктивных вариантов при обеспечении их эффективности по расходу стали и использованию площадей.

2. Разработаны конструктивное решение и способ возведения легкого здания из однотипных арочных элементов, которые позволяют реализовать сооружения произвольного пролета при оптимальном очертании и повысить эффективность конструкций путем включения ограждения в совместную работу.

3. Численные и экспериментальные исследования узлового соединения тонкостенных однотипных элементов арки показали его достаточную прочность и надежность. При натурных испытаниях несущая способность узлового соединения с расстановкой 6-ти самосверлящих самонарезающих винтов "по горизонтали" (вдоль полок элемента) на 5% превысила этот же показатель для случая установки 8-ми винтов "по окружности" вокруг центрального болта. На основе проведенных исследований получена расчетная формула по определению требуемого в узловом соединении однотипных элементов арки числа метизов с расстановкой "по горизонтали".

4. Предложены и исследованы способы повышения несущей способности узлового соединения тонкостенных однотипных элементов арки путем загиба участка стенки элемента, установки листового вкладыша и установки скобы из листовой стали, при этом первые два обеспечивают повышение несущей способности соединения до 2 раз, последний – до 1,5 раз.

5. Разработана методика нахождения оптимального очертания оси и количества однотипных элементов арок для случая реального многовариантного нагружения по критерию минимума массы, а также составлена программа для ЭВМ "ARKAMAS", реализующая указанную методику для трех-, двух- и бесшарнирных арок.

6. Показано, что оптимальное очертание оси арки, составленной из набора прямолинейных однотипных элементов, находится в пределах кривых, очерченных по дуге окружности и квадратной параболе. При этом очертание

кривой, которой принадлежат узлы полигональной арки, описывается полиномом 3-ей степени. Реализация оптимального очертания позволяет снизить расход стали в арках, составленных из набора однотипных элементов, по сравнению с традиционными очертаниями по дуге окружности и квадратной параболе: для трехшарнирных арок – от 15 до 42 %, для двухшарнирных арок – от 6 до 24 %, для бесшарнирных арок – от 10 до 42%. Для арок оптимального очертания с относительной высотой подъема стрелы в пределах  $0,3 \div 0,5$  оптимальное число однотипных элементов находится в интервале  $n_{opt} = (0,5 \div 0,7)L$ , где  $L$  – пролет арки, м.

7. Численные исследования НДС несущих и ограждающих конструкций арочного здания обнаружили резервы несущей способности при учете эффекта от их включения в совместную работу, в т.ч. за счет назначения рациональной схемы передачи внешних нагрузок. При включении ограждения из профилированного стального настила в работу каркаса снижение напряжений в расчетном сечении рядовой арки составило 10,5%, деформативности – 24%. В случае назначения рациональной схемы распределения внешних нагрузок на арку за счет изменения шага прогонов в пределах несущей способности обшивки снижение расхода металла на здание достигает 11% при установке 2-х прогонов вместо их регулярного расположения.

**Основное содержание диссертации опубликовано  
в следующих работах:**

1. *Фахрутдинов, А. Э.* Исследование действительной работы узлового соединения унифицированных элементов арки облегченного здания / А. Э. Фахрутдинов // Сборник научных трудов КазГАСУ : сб. ст. – Казань : КазГАСУ, 2010. – С. 63–68.
2. *Кузнецов, И. Л.* Арочные здания из унифицированных элементов / И. Л. Кузнецов, А. Э. Фахрутдинов // Известия КазГАСУ. – 2010. – № 1. – С. 122–126.
3. *Фахрутдинов, А. Э.* Назначение оптимального очертания оси арки, проектируемой по принципу «открытой» типизации / А. Э. Фахрутдинов, И. Л. Кузнецов // Сборник статей Международной научной конференции «Проблемы современного строительства», Пенза : АННОО «Приволжский Дом знаний». – 2011. – С. 220–223.
4. *Кузнецов, И. Л.* Назначение оптимального очертания оси арки из унифицированных элементов / И. Л. Кузнецов, А. Э. Фахрутдинов // Известия КазГАСУ. – 2011. – №1. – С. 115–121.
5. *Фахрутдинов, А. Э.* К вопросу повышения эффективности облегченного арочного здания с ограждением из профилированного стального настила / А. Э. Фахрутдинов, И. Л. Кузнецов // Сборник докладов VII-й Международной научной заочной конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологии», Липецк : Издательский центр «Гравис». – 2012. – С. 166–169.

- 102
6. *Фахрутдинов, А.Э.* Повышение эффективности узла соединения унифицированных элементов арки облегченного здания / А.Э. Фахрутдинов, И.Л. Кузнецов // Научный вестник ВГАСУ. – 2012. – № 1. – С. 26–33.
  7. Пат. 2423581 Российская Федерация, МПК Е 04 В 1/32. Способ возведения арочного здания / Кузнецов И.Л., Фахрутдинов А.Э. ; заявитель и патентообладатель КазГАСУ. – № 2009143694/03 ; заявл. 25.11.2009 ; опубл. 10.07.2011, Бюл. № 19. – 5 с.
  8. Пат. 2431720 Российская Федерация, МПК Е 04 В 1/38. Способ соединения тонкостенных элементов открытого сечения / Кузнецов И.Л., Гимранов Л.Р., Фахрутдинов А.Э. ; заявитель и патентообладатель КазГАСУ. – № 2010100011/03 ; заявл. 11.01.2010 ; опубл. 20.10.2011, Бюл. № 29. – 5 с.
  9. Пат. 2436906 Российская Федерация, МПК Е 04 В 1/38. Узел соединения тонкостенного сжатого элемента / Кузнецов И.Л., Фахрутдинов А.Э., Крайнов И.В. ; заявитель и патентообладатель КазГАСУ. – № 2010107712/03 ; заявл. 02.03.2010 ; опубл. 20.12.2011, Бюл. № 35. – 4 с.
  10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2012611500 Российская Федерация. ARKAMAS / Фахрутдинов А.Э., Кузнецов И.Л. ; заявитель и правообладатель КазГАСУ. – № 2011619522 ; заявл. 12.12.2011 ; опубл. 09.02.2012.

Подписано к печати «26» октября 2012 г.    Формат 60х84/16    Печать RISO

Объем 1,0 п.л.

Заказ № 477

Тираж 100 экз.

---

Отпечатано в полиграфическом секторе Издательства КГАСУ.

420043, Казань, ул. Зеленая, д.1